

# LABORATOIRE DE PHYSIQUE I : METROLOGIE

Iva Tkalcec Vâju, Daniele Mari

Travaux Pratiques  
seront donnés dans la salle

**PH CI 425**

**[plan.epfl.ch](http://plan.epfl.ch)**

Toute la documentation du cours sera  
accessible online à l'adresse

**[moodle.epfl.ch](http://moodle.epfl.ch)**

# Horaire

La video et les slides du cours de la semaine suivante sont mis sur Moodle le vendredi.  
Leur visionnement est obligatoire avant le cours.  
Les heures de présence seront ainsi axées sur la pratique !

Mardi

Groupe A 10h15 -12h15

Groupe B 15h00 -17h00 ?

Mercredi

Groupe C 11h15 - 13h15

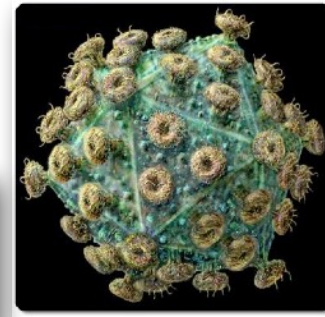
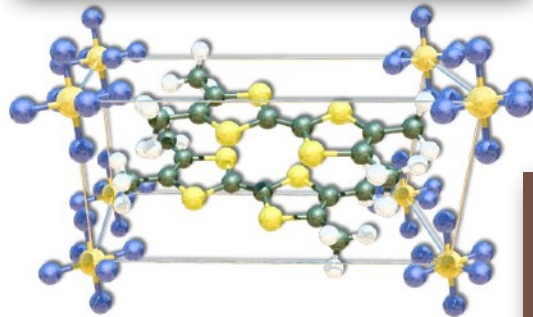
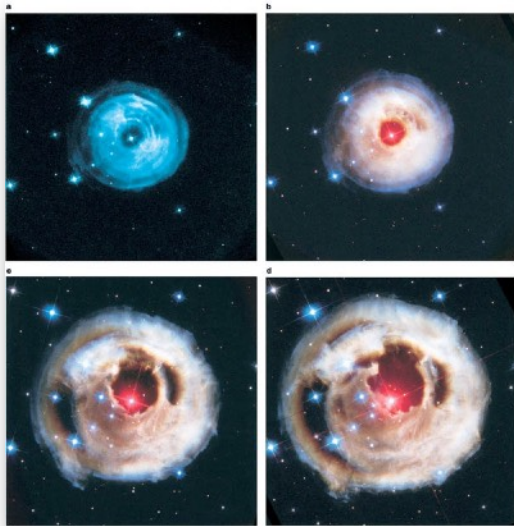
Groupe D 14h00 -16h00



# Ordres de grandeur et système d'unités

Daniele Mari

EPFL



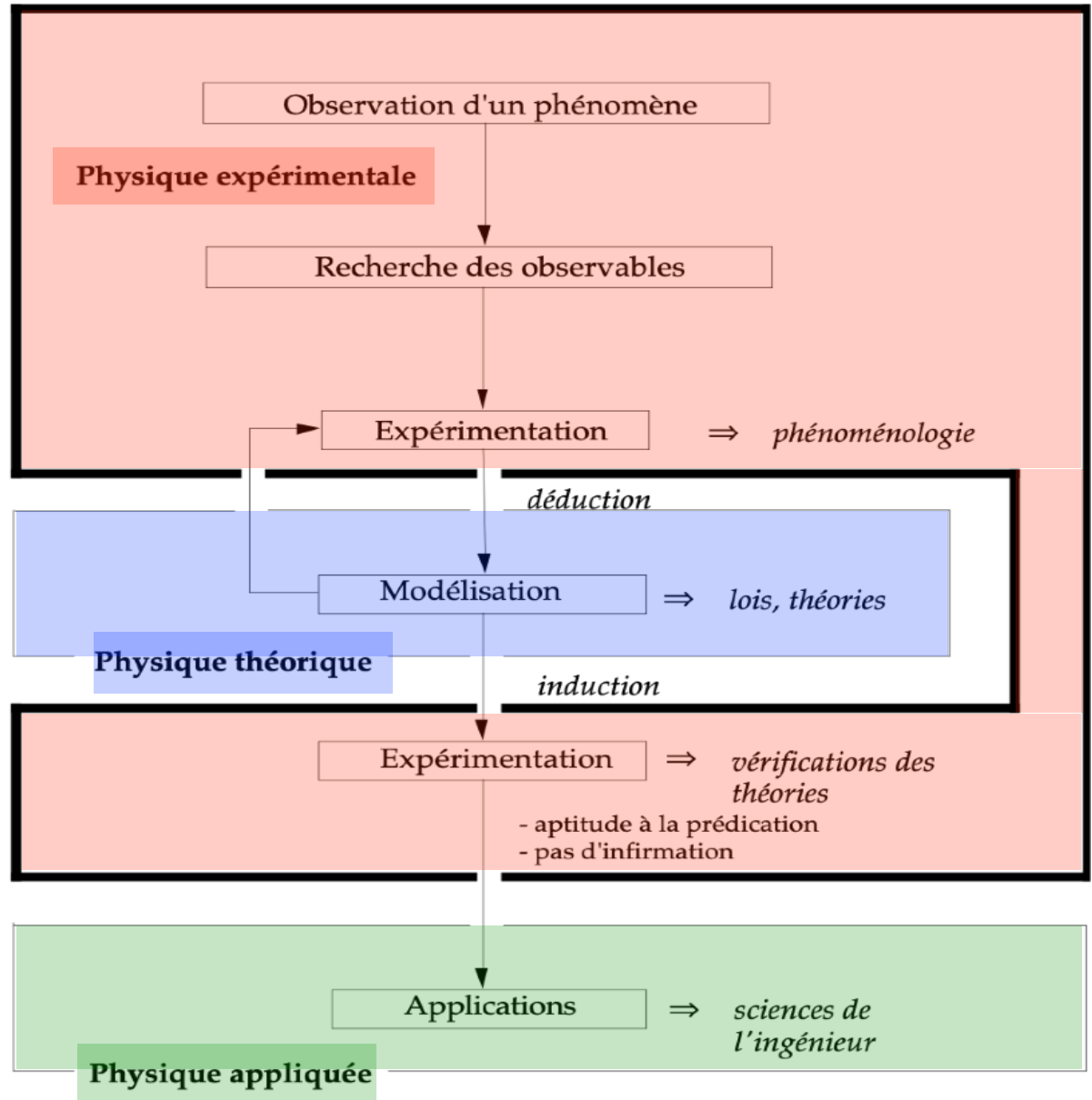
# Qu'est-ce que la physique?

## La démarche du physicien:

### Définition de la physique:

$\varphi\upsilon\varsigma\iota\varsigma = \textit{nature}$

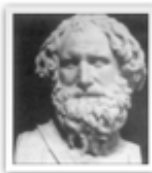
*Larousse:* science qui étudie les propriétés de la matière, de l'espace et du temps, et qui établit les lois qui rendent compte des phénomènes naturels.



# La physique *d'hier* (<1900)



Ampère



Archimede



Avogadro



Bernoulli



Biot



Boltzman



Boyle



Celsius



Copernic



Coulomb



Dalton



Faraday



Foucault



Fresnel



Galilee



Galvani



Gay-Lussac



Hertz



Hooke



Huygens



Joule



Kelvin



Mariotte



Maxwell



Navier



Newton



Oersted



Ohm



Pascal



Rötgen



Savart



Stockes



Tesla



Volta



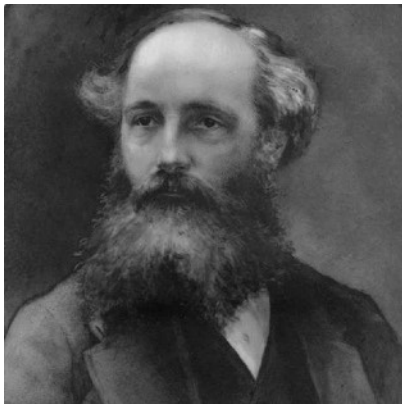
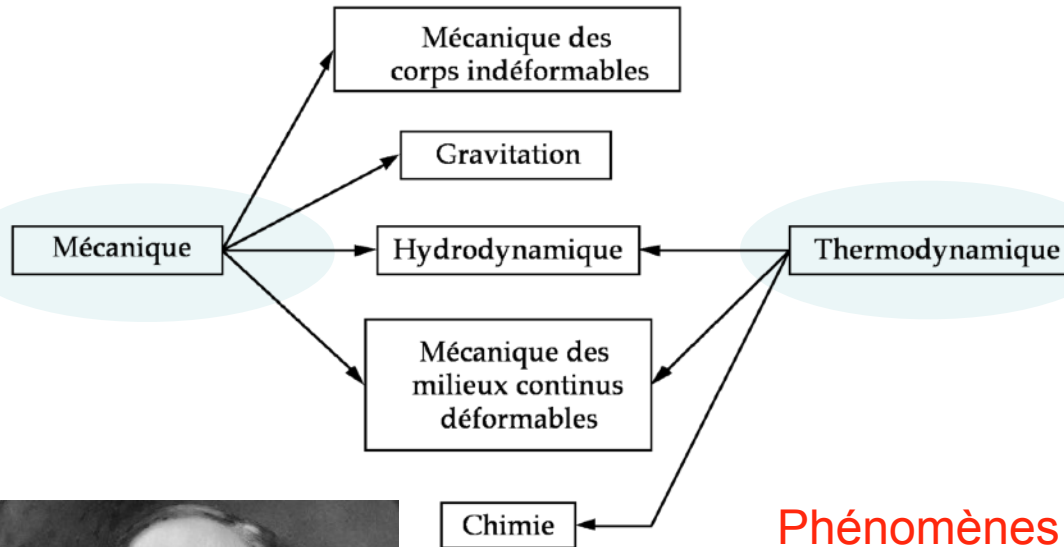
Watt

# La physique *d'hier* (<1900)

## Phénomènes de nature corpusculaire

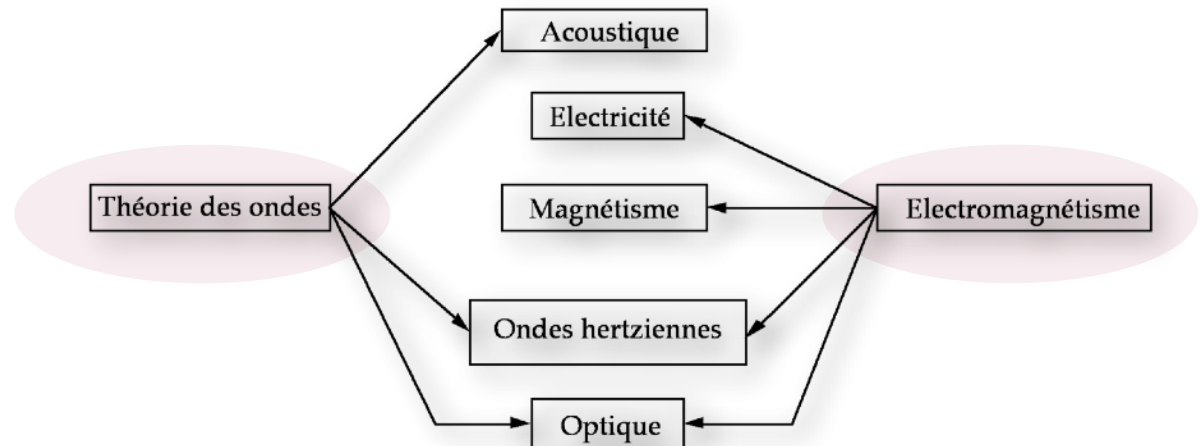


Isaac Newton



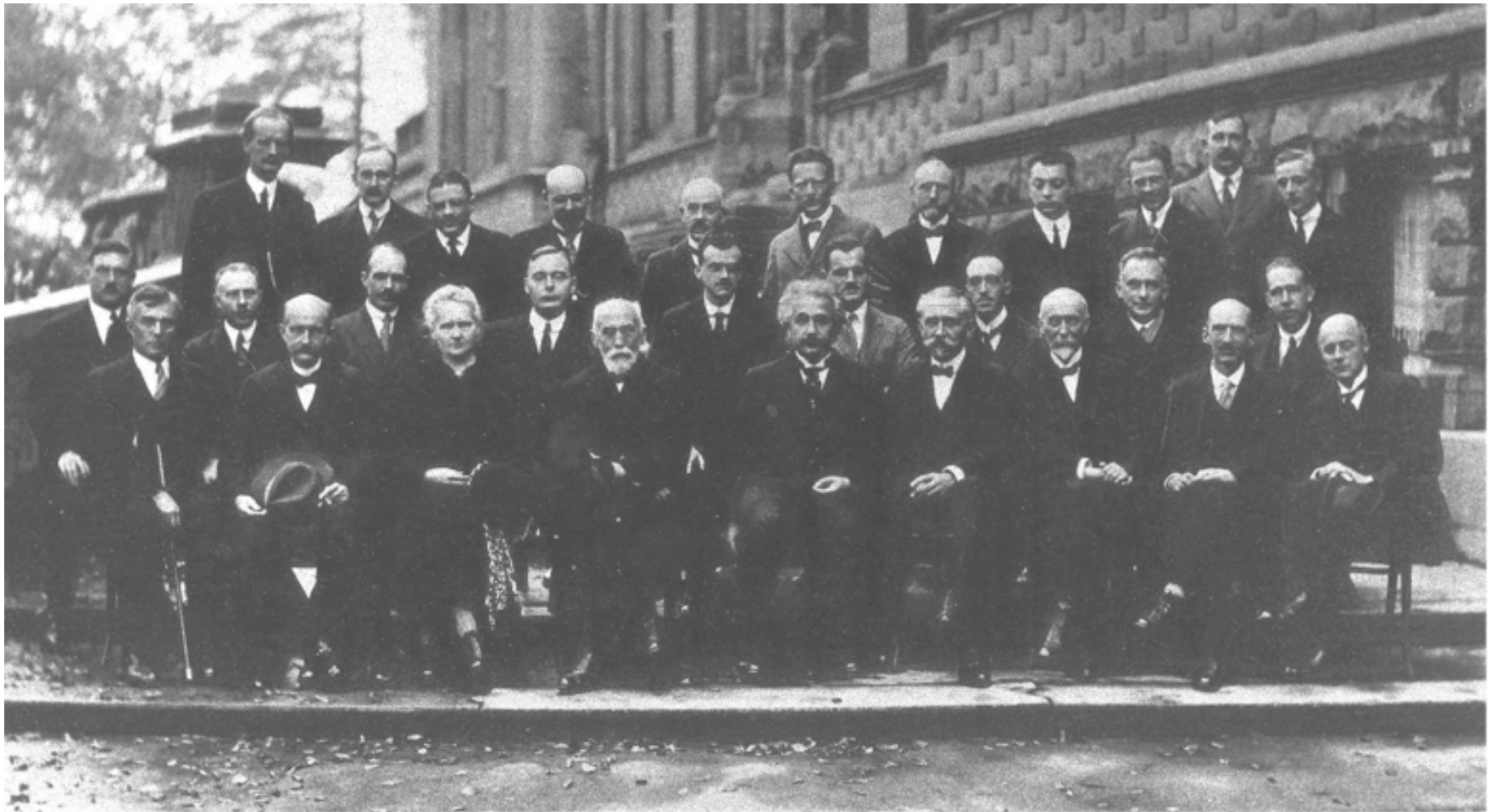
James Maxwell

## Phénomènes de nature ondulatoire





# La physique *d'aujourd'hui* (>1900)



A. PICCARD   E. HENRIOT   Ed. HERZEN   Th. DE DONDER   E. SCHROEDINGER   W. PAULI   R. H. FOWLER   W. HEISENBERG   L. BRILLOUIN  
P. DEBYE   M. KNUDSEN   P. EHRENFEST   H. A. KRAMERS   P. A. M. DIRAC   A. H. COMPTON   E. VERSCHAFFELT   L. V. DE BROGLIE   M. BORN   N. BOHR  
I. LANGMEIR   M. PLANCK   MADAME CURIE   H. A. LORENTZ   A. EINSTEIN   P. LANGEVIN   CH. E. GUYE   C. T. R. WILSON  
O. W. RICHARDSON  
ABSENTS: SIR W. H. BRAGG   M. H. DESLANDRES   ET E. VAN AUBEL



# La physique *d'aujourd'hui* (>1900)

Mécanique des très grandes vitesses

Relativité restreinte

Gravitation universelle

Relativité générale

Dualité ondes-corpuscules

Physique quantique

Macrocosme

Astrophysique

Cosmologie

Microcosme

Physique des particules

Physique nucléaire

Physique atomique



Einstein



Planck



Bohr



De Broglie



Schrödinger



Heisenberg



Dirac



Pauli

# La physique *de demain ? (c'est déjà aujourd'hui)*

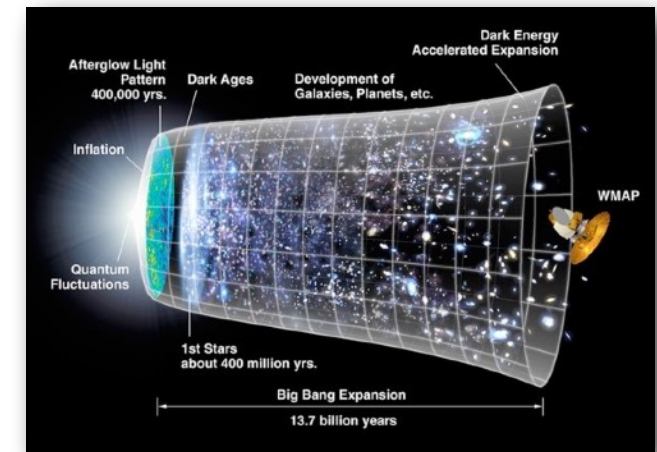
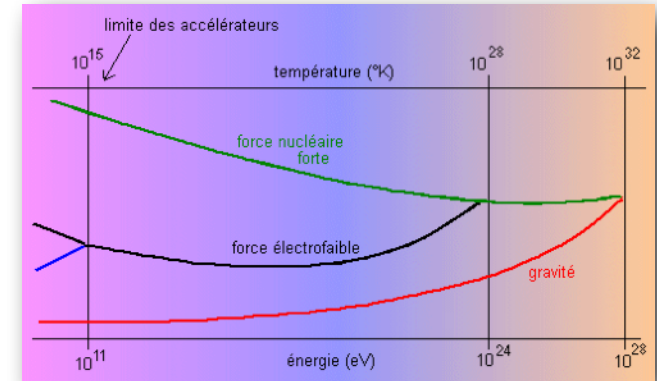
Unifications

Champs de force

Intensité

Portée

	Boson de Higgs		Force de gravitation	$10^{-36}$	infinie décrois.
			Force électromagnétique	$1/137$	infinie décrois.
			Force faible	$10^{-5}$	$10^{-17}$ m
		W, Z <sub>0</sub>	Force forte	1	infinie crois.



Théories  
unifiées des  
champs

⇐



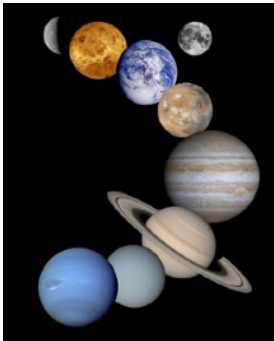



Grands problèmes  
actuels

⇒

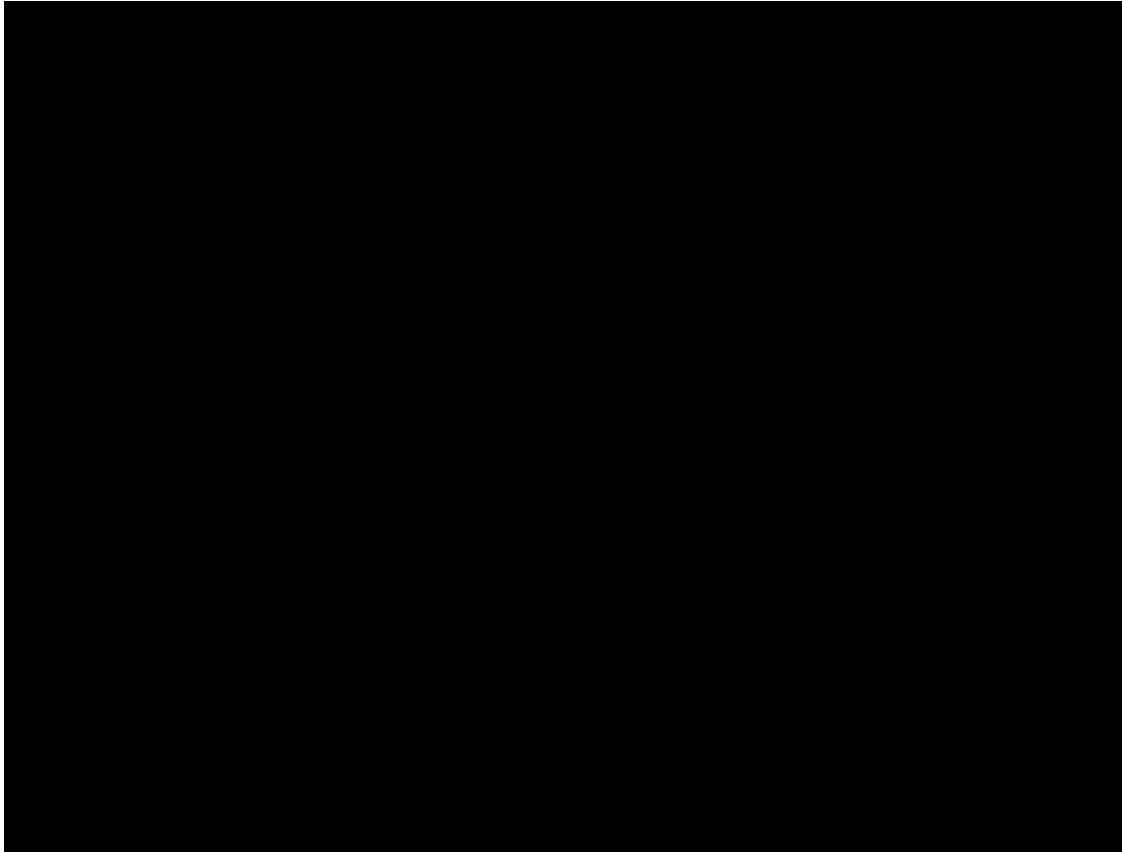
Cosmologie  
(naissance de  
l'Univers)

# Ordres de grandeur en physique

## Le macrocosme: astronomie, astrophysique, cosmologie

$10^{11}$ Galaxies	$10^{11}$ Etoiles		
<b>Univers</b>	<b>Galaxies</b>	<b>Systèmes</b>	<b>Objets célestes</b>
			
$\phi_{Univ} \cong 10^{26}$ m	$\phi_{gal} \cong 10^{21}$ m	$r_{orbit} \cong 1.5 \cdot 10^{11}$ m	$\phi \cong 10^3$ m $6 \cdot 10^6$ m $7 \cdot 10^8$ m
$\lambda_{Planck} \cong 10^{-35}$ m		[Tm]	[km]    [Mm]    [Gm]
 <p>force de gravitation</p>			
 <p>??    Forte    'Thermique'    EM</p>			





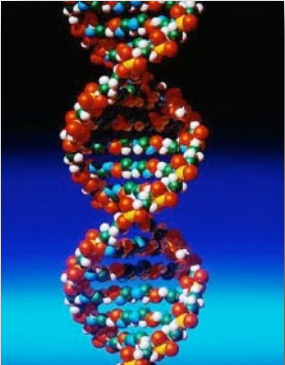

# Powers of Ten™ (1977)





# Ordres de grandeur en physique

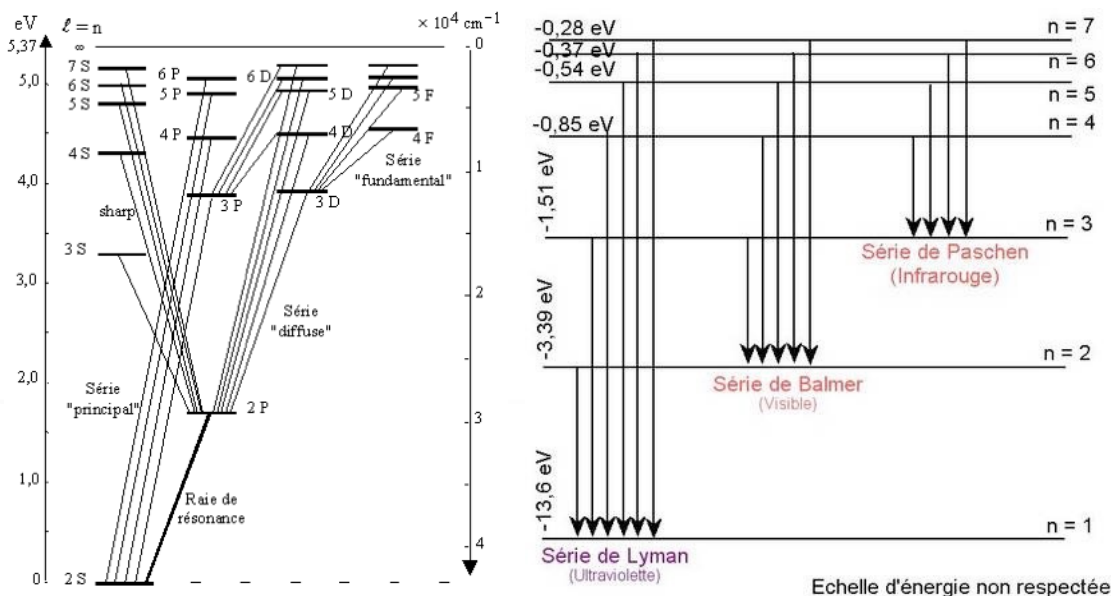
## Le biocosme: biologie, biochimie, biophysique

$10^{51}$ Atomes $9 \cdot 10^9$ Humains	$10^{28}$ Atomes $10^{12}$ Cellules	$10^{12}$ Atomes	$10^{10}$ Atomes	$10^8$ - $10^{10}$ Atomes
	 évolution			
$\phi_{ter} = 6 \cdot 10^6$ m [Mm]	$h = 1.75$ m [m]	$\phi_{cel} \cong 10^{-6}$ m [ $\mu$ m]	$d_{vir} \cong 10^{-7}$ m > [nm]	$l_{DNA} \cong 10^{-7}$ m > [nm]
 force électromagnétique (EM)				

## *Le microcosme à l'échelle atomique: physique atomique*

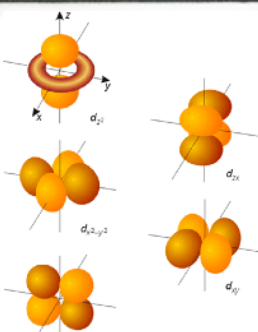
Periodic Table for the *Table of Isotopes* (1999)

Periodic Table for the Table of Isotopes (1993)																	
1 (IA)																18 (VIIIA)	
<b>Hydrogen</b>																<b>Helium</b>	
$\text{H}_1$	$\text{H}_2$															$\text{He}_1$	$\text{He}_2$
1.00784	2.01568															4.002602	4.002602
0.000135	0.000135															2.0235	2.0235
2 (IIA)																	
<b>Lithium</b>																	
$\text{Li}_1$	$\text{Li}_2$																
6.941	7.01603																
0.00054	0.00054																
3 (IIIA)																	
<b>Boron</b>																	
$\text{B}_1$	$\text{B}_2$																
10.811	11.00931																
0.00012	0.00012																
4 (IVA)																	
<b>Carbon</b>																	
$\text{C}_1$	$\text{C}_2$																
12.0107	12.0107																
0.00011	0.00011																
5 (VA)																	
<b>Nitrogen</b>																	
$\text{N}_1$	$\text{N}_2$																
14.00643	15.00486																
0.00015	0.00015																
6 (VIA)																	
<b>Oxygen</b>																	
$\text{O}_1$	$\text{O}_2$																
15.99903	16.99913																
0.00039	0.00039																
7 (VIIA)																	
<b>Fluorine</b>																	
$\text{F}_1$	$\text{F}_2$																
18.99840	19.99842																
0.00087	0.00087																
8 (VIIIA)																	
<b>Neon</b>																	
$\text{Ne}_1$	$\text{Ne}_2$																
20.1797	20.1797																
0.00003	0.00003																
9 (IIIB)																	
<b>Scandium</b>																	
$\text{Sc}_1$	$\text{Sc}_2$																
44.95591	45.95591																
0.00007	0.00007																
10 (IVB)																	
<b>Titanium</b>																	
$\text{Ti}_1$	$\text{Ti}_2$																
47.88	47.88																
0.00005	0.00005																
11 (VB)																	
<b>Vanadium</b>																	
$\text{V}_1$	$\text{V}_2$																
50.9415	50.9415																
0.00006	0.00006																
12 (VIB)																	
<b>Chromium</b>																	
$\text{Cr}_1$	$\text{Cr}_2$																
51.9961	51.9961																
0.00009	0.00009																
13 (VIIB)																	
<b>Manganese</b>																	
$\text{Mn}_1$	$\text{Mn}_2$																
54.93804	54.93804																
0.00009	0.00009																
14 (VIII)																	
<b>Iron</b>																	
$\text{Fe}_1$	$\text{Fe}_2$																
55.845	55.845																
0.00006	0.00006																
15 (VIII)																	
<b>Cobalt</b>																	
$\text{Co}_1$	$\text{Co}_2$																
58.93319	58.93319																
0.00006	0.00006																
16 (VIII)																	
<b>Nickel</b>																	
$\text{Ni}_1$	$\text{Ni}_2$																
58.6934	58.6934																
0.00006	0.00006																
17 (VIII)																	
<b>Copper</b>																	
$\text{Cu}_1$	$\text{Cu}_2$																
63.546	63.546																
0.00006	0.00006																
18 (VIII)																	
<b>Zinc</b>																	
$\text{Zn}_1$	$\text{Zn}_2$																
65.38	65.38																
0.00006	0.00006																
19 (IIIB)																	
<b>Gallium</b>																	
$\text{Ga}_1$	$\text{Ga}_2$																
69.723	69.723																
0.00007	0.00007																
20 (IVB)																	
<b>Germanium</b>																	
$\text{Ge}_1$	$\text{Ge}_2$																
72.61	72.61																
0.00006	0.00006																
21 (VB)																	
<b>Arsenic</b>																	
$\text{As}_1$	$\text{As}_2$																
74.9216	74.9216																
0.00006	0.00006																
22 (VIB)																	
<b>Selenium</b>																	
$\text{Se}_1$	$\text{Se}_2$																
78.96	78.96																
0.00006	0.00006																
23 (VIIB)																	
<b>Bromine</b>																	
$\text{Br}_1$	$\text{Br}_2$																
79.904	79.904																
0.00005	0.00005																
24 (VIII)																	
<b>Krypton</b>																	
$\text{Kr}_1$	$\text{Kr}_2$																
83.80	83.80																
0.00001	0.00001																
25 (VIII)																	
<b>Rubidium</b>																	
$\text{Rb}_1$	$\text{Rb}_2$																
85.468	85.468																
0.00006	0.00006																
26 (VIII)																	
<b>Strontium</b>																	
$\text{Sr}_1$	$\text{Sr}_2$																
87.62	87.62																
0.00006	0.00006																
27 (VIII)																	
<b>Yttrium</b>																	
$\text{Y}_1$	$\text{Y}_2$																
88.90584	88.90584																
0.00006	0.00006																
28 (VIII)																	
<b>Zirconium</b>																	
$\text{Zr}_1$	$\text{Zr}_2$																
91.224	91.224																
0.00006	0.00006																
29 (VIII)																	
<b>Niobium</b>																	
$\text{Nb}_1$	$\text{Nb}_2$																
92.90638	92.90638																
0.00006	0.00006																
30 (VIII)																	
<b>Molybdenum</b>																	
$\text{Mo}_1$	$\text{Mo}_2$																
95.94	95.94																
0.00006	0.00006																
31 (VIII)																	
<b>Technetium</b>																	
$\text{Tc}_1$	$\text{Tc}_2$																
98.90625	98.90625																
0.00006	0.00006																
32 (VIII)																	
<b>Ruthenium</b>																	
$\text{Ru}_1$	$\text{Ru}_2$																
101.07	101.07																
0.00006	0.00006																
33 (VIII)																	
<b>Rhodium</b>																	
$\text{Rh}_1$	$\text{Rh}_2$																
102.90550	102.90550																
0.00006	0.00006																
34 (VIII)																	
<b>Palladium</b>																	
$\text{Pd}_1$	$\text{Pd}_2$																
106.42	106.42																
0.00006	0.00006																
35 (VIII)																	
<b>Silver</b>																	
$\text{Ag}_1$	$\text{Ag}_2$																
107.8682	107.8682																
0.00006	0.00006																
36 (VIII)																	
<b>Cadmium</b>																	
$\text{Cd}_1$	$\text{Cd}_2$																
112.411	112.411																
0.00006	0.00006																
37 (VIII)																	
<b>Indium</b>																	
$\text{In}_1$	$\text{In}_2$																
114.818	114.818																
0.00006	0.00006																
38 (VIII)																	
<b>Tin</b>																	
$\text{Sn}_1$	$\text{Sn}_2$																
118.710	118.710																
0.00006	0.00006																
39 (VIII)																	
<b>Antimony</b>																	
$\text{Sb}_1$	$\text{Sb}_2$																
121.757	121.757																
0.00006	0.00006																
40 (VIII)																	
<b>Tellurium</b>																	
$\text{Te}_1$	$\text{Te}_2$																
127.603	127.603																
0.00006	0.00006																
41 (VIII)																	
<b>Iodine</b>																	
$\text{I}_1$	$\text{I}_2$																
126.90509	126.90509																
0.00006	0.00006																
42 (VIII)																	
<b>Xenon</b>																	
$\text{Xe}_1$	$\text{Xe}_2$																
131.29	131.29																
0.00006	0.00006																
43 (VIII)																	
<b>Cesium</b>																	
$\text{Cs}_1$	$\text{Cs}_2$																
132.90545	132.90545																
0.00006	0.00006																
44 (VIII)																	
<b>Barium</b>																	
$\text{Ba}_1$	$\text{Ba}_2$																
137.327	137.327																
0.00006	0.00006																
45 (VIII)																	
<b>Lanthanum</b>																	
$\text{La}_1$	$\text{La}_2$																
138.90547	138.90547																
0.00006	0.00006																
46 (VIII)																	
<b>Praseodymium</b>																	
$\text{Pr}_1$	$\text{Pr}_2$																
140.90765	140.90765																
0.00006	0.00006																
47 (VIII)																	
<b>Neodymium</b>																	
$\text{Nd}_1$	$\text{Nd}_2$																
144.242	144.242																
0.00006	0.00006																
48 (VIII)																	
<b>Promethium</b>																	
$\text{Pm}_1$	$\text{Pm}_2$																
144.9127	144.9127																
0.00006	0.00006																
49 (VIII)																	
<b>Samarium</b>																	
$\text{Sm}_1$	$\text{Sm}_2$																
150.358	150.358																
0.00006	0.00006																
50 (VIII)																	
<b>Erbium</b>																	
$\text{Er}_1$	$\text{Er}_2$																
167.259	167.259																
0.00006	0.00006																
51 (VIII)																	
<b>Thulium</b>																	
$\text{Tm}_1$	$\text{Tm}_2$																
168.93032	168.93032																
0.00006	0.00006																
52 (VIII)																	
<b>Ytterbium</b>																	
$\text{Yb}_1$	$\text{Yb}_2$																
173.05469	173.05469																
0.00006	0.00006																
53 (VIII)																	
<b>Lutetium</b>																	
$\text{Lu}_1$	$\text{Lu}_2$																
174.967	174.967																
0.00006	0.00006																
54 (VIII)																	
<b>Hafnium</b>																	
$\text{Hf}_1$	$\text{Hf}_2$																
178.49	178.49																
0.00006	0.00006																
55 (VIII)																	
<b>Tantalum</b>																	
$\text{Ta}_1$	$\text{Ta}_2$																
180.94788	180.94788																
0.00006	0.00006																
56 (VIII)																	
<b>Tungsten</b>																	
$\text{W}_1$	$\text{W}_2$																
183.84	183.84																
0.00006	0.00006																
57 (VIII)																	
<b>Rhenium</b>																	
$\text{Re}_1$	$\text{Re}_2$																
186.207	186.207																
0.00006	0.00006																
58 (VIII)																	
<b>Osmium</b>																	
$\text{Os}_1$	$\text{Os}_2$																
190.23	190.23																
0.00006	0.00006																
59 (VIII)																	
<b>Iridium</b>																	
$\text{Ir}_1$	$\text{Ir}_2$																
192.222	192.222																
0.00006	0.00006																
60 (VIII)																	
<b>Rhodium</b>																	
$\text{Rh}_1$	$\text{Rh}_2$																
186.90748	186.90748																
0.00006	0.00006																
61 (VIII)																	
<b>Palladium</b>																	
$\text{Pd}_1$	$\text{Pd}_2$																
106.42	106.42																
0.00006	0.00006																
62 (VIII)																	
<b>Silver</b>																	
$\text{Ag}_1$	$\text{Ag}_2$																
107.8682	107.8682																
0.00006	0.00006																
63 (VIII)																	
<b>Cadmium</b>																	
$\text{Cd}_1$	$\text{Cd}_2$																
112.411	112.411																
0.00006	0.00006																
64 (VIII)																	
<b>Indium</b>																	
$\text{In}_1$	$\text{In}_2$																
114.818	114.818																
0.00006	0.00006																
65 (VIII)																	
<b>Tin</b>																	
$\text{Sn}_1$	$\text{Sn}_2$																
118.710	118.710																
0.00006	0.00006																
66 (VIII)																	
<b>Antimony</b>																	
$\text{Sb}_1$	$\text{Sb}_2$																
121.757	121.757																
0.00006	0.00006																
67 (VIII)																	
<b>T</b>																	

[illegible]

Echelle d'énergie non respectée

## 108 *Eléments*


$$\phi_{at} \cong 10^{-10} \text{ m}$$

[nm]

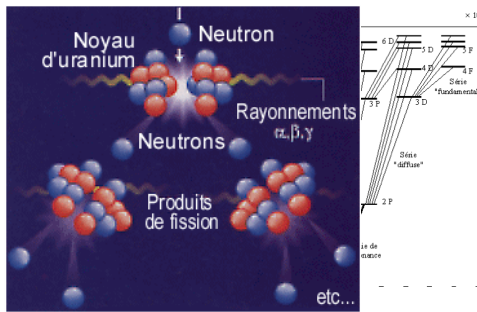
force électromagnétique (EM)

# Ordres de grandeur en physique

## Le microcosme à l'échelle nucléaire: physique nucléaire

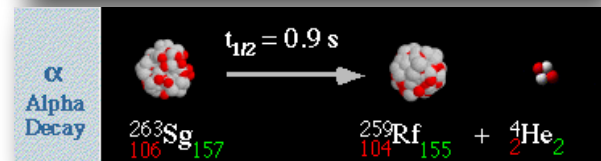
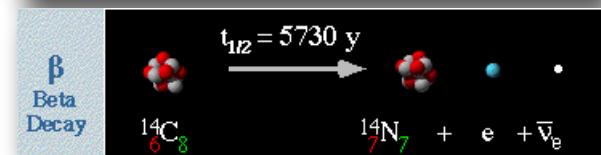
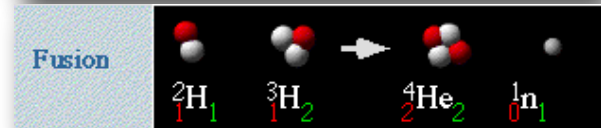
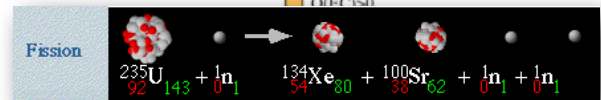
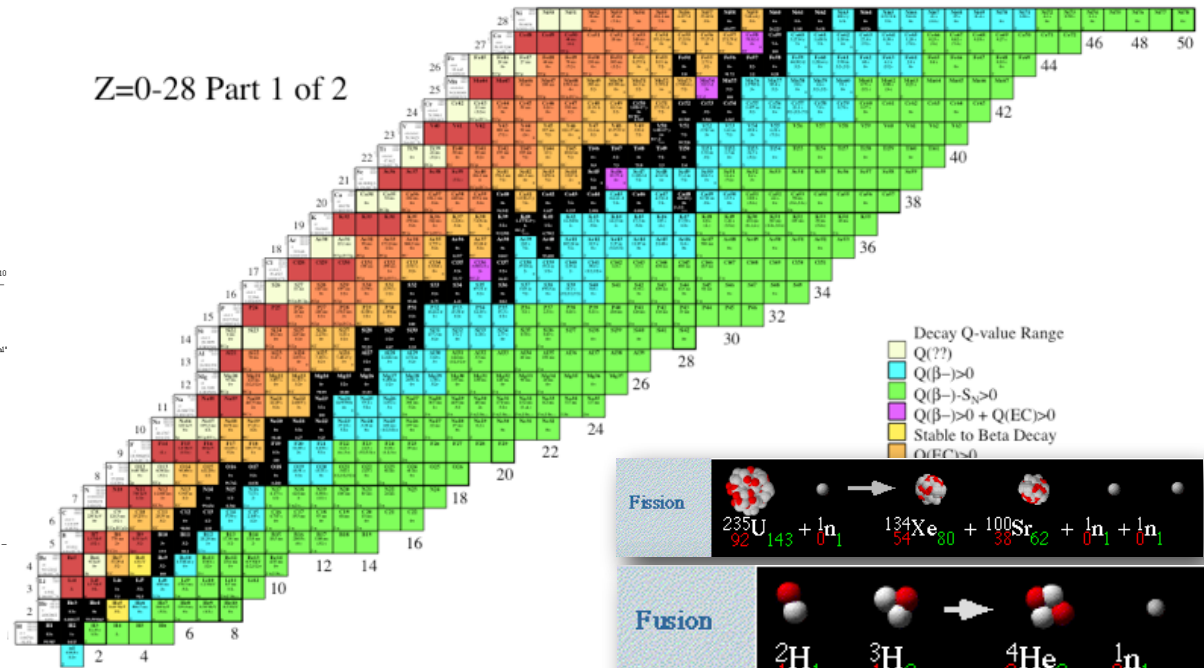
Table of Isotopes (1998)

Z=0-28 Part 1 of 2



$$\phi_{\text{noy}} \cong 10^{-15} \text{ m}$$

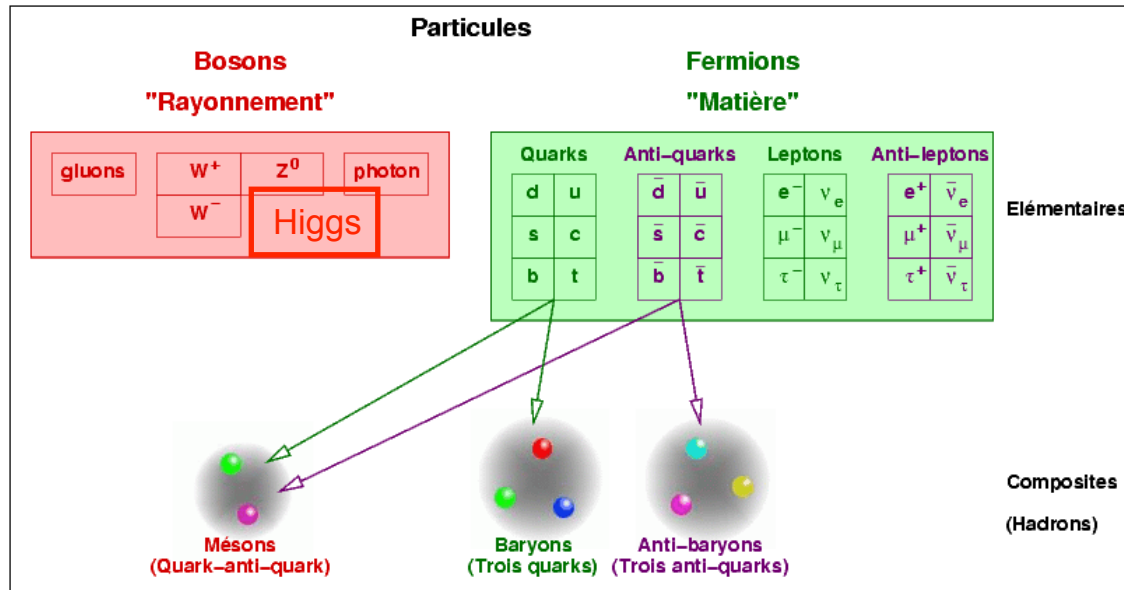
[fm]



Force Forte + (EM)

# Ordres de grandeur en physique

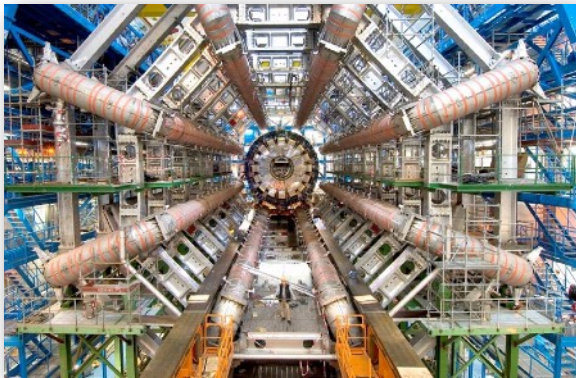
## Le microcosme à l'échelle des particules élémentaires: physique des particules



$$\left\{ \begin{array}{l} 6 \text{ leptons} \\ 6 \text{ quarks} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{photon (EM)} \\ Z \text{ bosons (weak)} \\ \text{gluons (strong)} \end{array} \right\}$$



$$\begin{array}{ll} \phi_{bar} \cong 10^{-16} \text{ m} & \phi_{lept} < 10^{-18} \text{ m} \\ < [\text{fm}] & < [\text{am}] \end{array}$$



← forces fortes et électro-faibles →



# Le Système International d'Unités

## Naissance du SI

18ème siècle: abondance de différentes mesures  
[Vaud: 70 unités (alors que 4 étaient suffisantes !)]

**1795** système métrique [m, kg, s]

1875: convention internationale du mètre (l, s, V, poids)

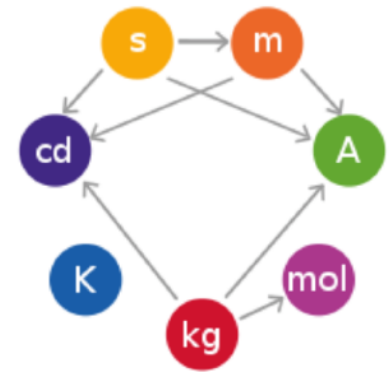
1901: Système de Giorgi [m, kg, s, \_\_\_]

1948: Système MKSA [m, kg, s, A]

1960: Système international SI [m, kg, s, A, K, Cd, mol]

20 mai 2019: Nouveau système international

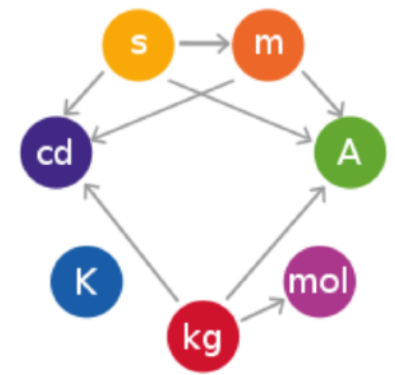
7 unités de base, dont 6 sont (**toutes**)  
définies **intrinsiquement** et de  
manière reproductible en laboratoire.



# Le Système International d'Unités

La révolution

Paris 20 mai 1799



## ■ La distance

### Définitions du mètre (m) :

**1791** : dix-millionième partie d'un quart de méridien terrestre  
(c'est de là que vient le fait que la circonférence de la Terre est 40 000 km)



Jean-Baptiste Joseph DELAMBRE  
(1747 - 1822)



Pierre-François MECHAIN  
(1744-1804)

*7 ans pour mesurer le  $\frac{1}{4}$  de méridien (L) de Dunkerque à Barcelone*

1 mètre =  $10^{-7}$  L

**1889 à 1960 :**

*barre de platine-iridium utilisée comme étalon pour le mètre*



**1983:** distance parcourue par la lumière dans le vide en  $\frac{1}{299\,792\,458}$  s

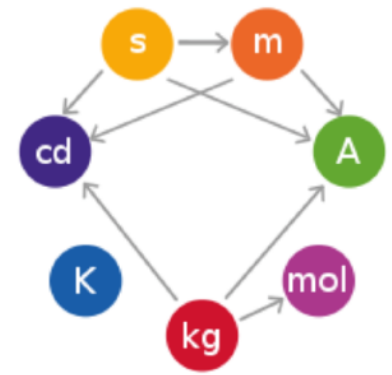
# Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international

## Mètre

Le mètre, **m**, est l'unité de longueur ; sa valeur est définie en fixant la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide à exactement 299 792 458 quand elle est exprimée en  $\text{m s}^{-1}$ .

**Méthode de mesure:  
optique (interférométrie)**

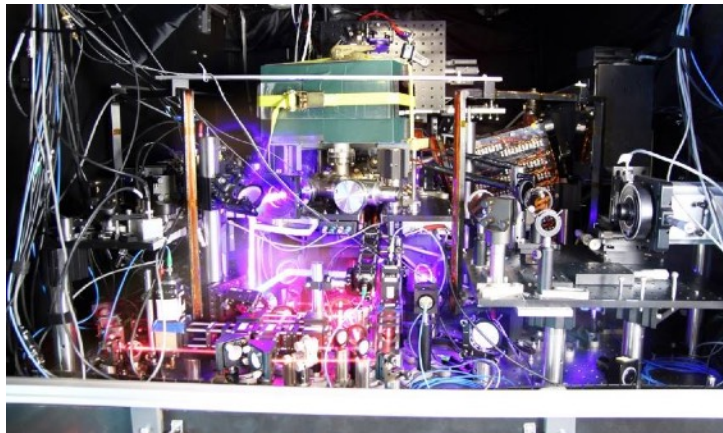




# ■ Le temps

## Définitions de la seconde (s) :

- En **1791** :  $1/86400$  parties du jour
- En **1960**, pour tenir compte des irrégularités du mouvement de la terre, elle a été définie comme une fraction de l'année solaire 1900
- Depuis **1967**, la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux d'énergies de l'état fondamental de l'atome de césium 133 pris à 0 K (précision actuelle  $10^{-14}$ )



*Horloge atomique*

# Le Système International d'Unités

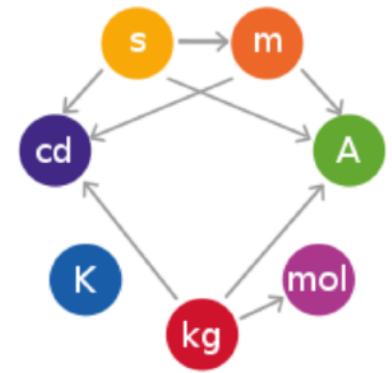
## Les définitions du nouveau système international

### Seconde

La seconde, **s**, est l'unité de durée ; sa valeur est définie en fixant la valeur du nombre de périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à la température du zéro absolu à exactement 9 192 631 770 quand elle est exprimée en  $s^{-1}$ .

### méthode de mesure: horloge atomique

fontaine de Cesium



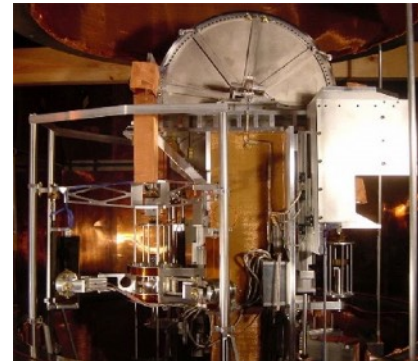
## ■ la masse

### Définitions du kilogramme (kg) :

- Le gramme a été introduit pendant la Révolution française en **1795** (masse d'un centimètre cube d'eau à 4°C)
- **1875**, l'unité de masse fut redéfinie comme «kilogramme » (seule unité du SI incluant un préfixe multiplicateur)
- **1889**, le prototype du kilogramme (cylindre de platine iridié) est conservé au Bureau International des Poids et Mesures (Paris)
- **2019**, nouvelle définition du kg, exprimé en fonction de la constante de Planck



<https://www.bipm.org/fr/measurement-units/>



balance de Kibble

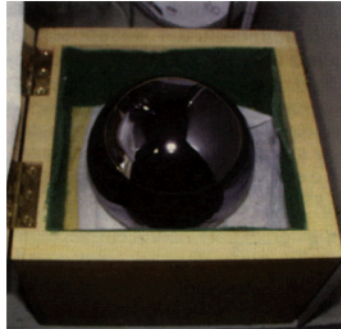
Dernière unité intrinsèque, pourquoi ?

# Le Système International d'Unités

## Problème de la définition intrinsèque du kilogramme!

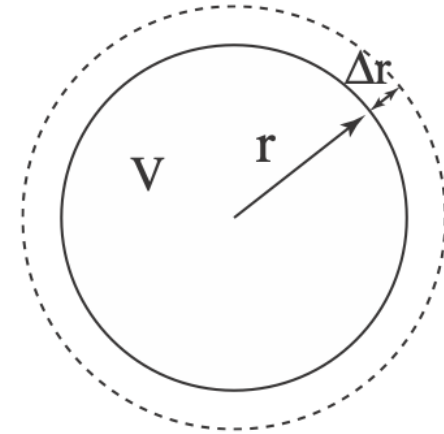


Copie de l'étalon de Sèvres



Boule de Si monocristallin  
de 1 kg (usinée à <10 nm)

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{4\pi r^2 \Delta r}{\frac{4}{3}\pi r^3} = 3 \frac{\Delta r}{r}$$



Pour obtenir une variation  $< 10^{-8}$  sur le volume (masse) il faut:

$$\frac{\Delta r}{r} = 3 \cdot 10^{-9} \Rightarrow \Delta r = 3 \cdot 10^{-9} \cdot r$$

Considérons par exemple une boule de silicium avec  $r \simeq 10$  cm

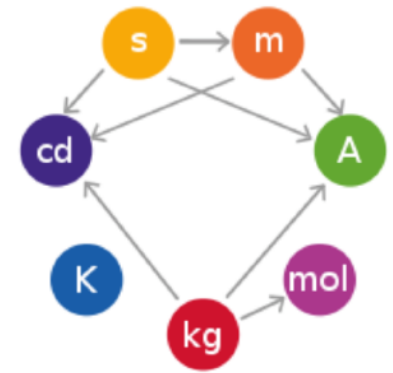
$$\Delta r = 3 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0.3 \text{ nm} = 1 \text{ distance atomique !!}$$

=>>> Un étalon de masse de 1 kg, de précision  $< 10^{-8}$ , sous forme d'une boule de Silicium, nécessiterait un usinage avec une précision de 0.3 nm !!!



# Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international



## Kilogramme (nouvelle définition)

Le kilogramme, **kg**, est l'unité de masse ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Planck à exactement  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$  quand elle est exprimée en  $\text{s}^{-1} \text{m}^2 \text{kg}$ , ce qui correspond à des J s.

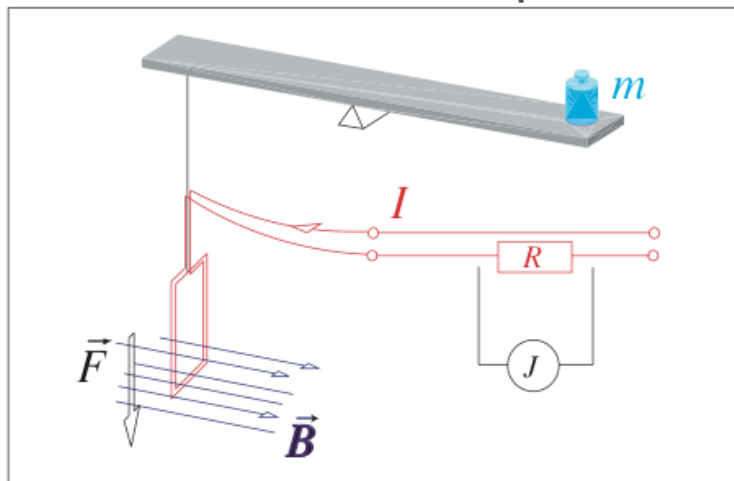
**Méthodes de mesure:**  
**Sphère de silicium !**  
**Balance du watt**



# Le Système International d'Unités: la balance du Watt

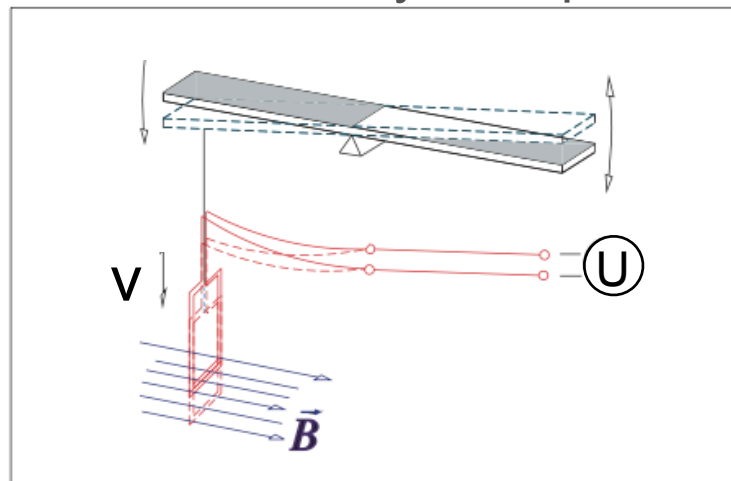
Définition intrinsèque du kg avec une précision de  $10^{-8}$  :

Mesure statique



$$I(B l) = m \cdot g$$

Mesure dynamique



$$U = V(B l)$$

$\Rightarrow$

$$m = \frac{U \cdot I}{g \cdot V}$$

- U mesuré par *effet Josephson*
- I mesuré par *effet Hall quantique*
- V mesuré par *interférométrie laser*
- g mesuré par *interférométrie gravimétrique*

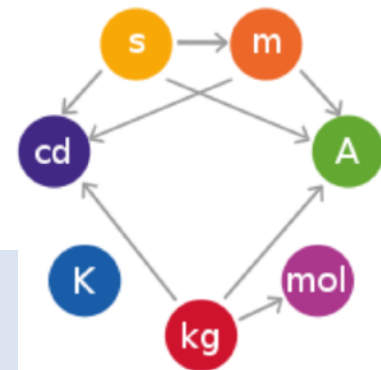
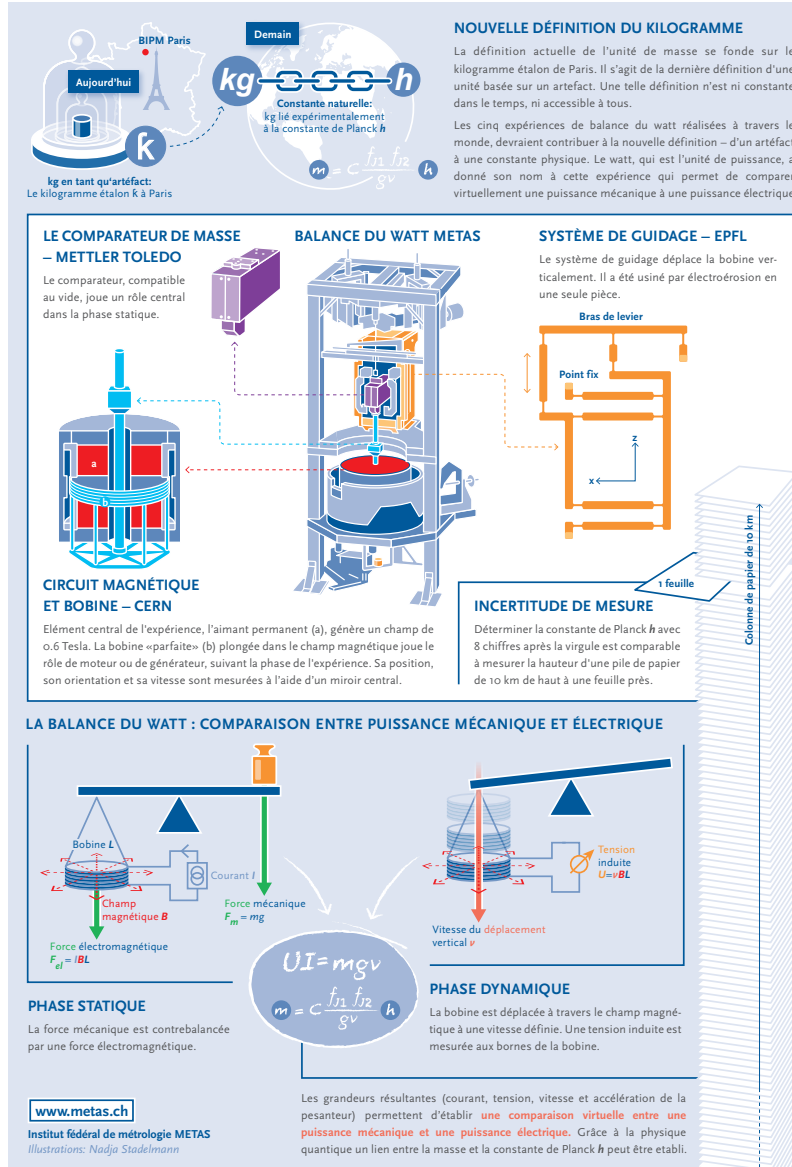
# Le Système International d'Unités

## Réalisation d'une balance du Watt au METAS

Office fédéral de métrologie et d'accréditation

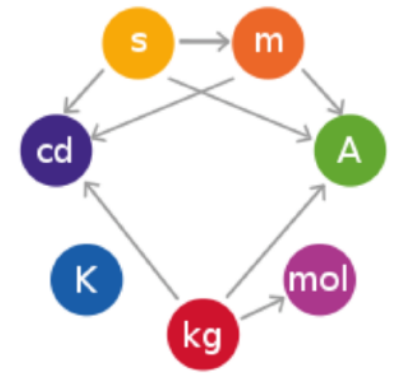


### Comment la balance du watt fonctionne



# Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international



## Ampère

L'ampère, **A**, est l'unité du courant électrique ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire à exactement  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$  quand elle est exprimée en A s, ce qui correspond à des coulombs.

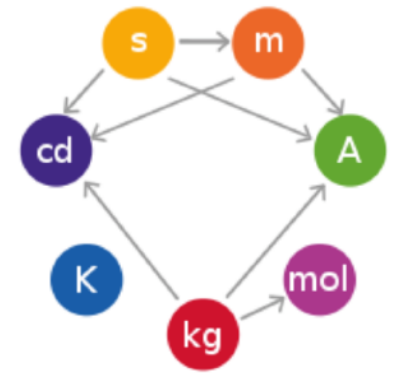
## Méthode de mesure:

**Loi d'Ohm : nouvelles définitions de l'Ohm et du Volt à partir de constantes fondamentales**

**Futur: comptage des électrons qui passent :)**

# Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international



## Kelvin

Le kelvin, K, est l'unité thermodynamique de température ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Boltzmann à exactement  $1.380\,649 \times 10^{-23}$  quand elle est exprimée en  $\text{s}^{-2} \text{m}^2 \text{kg K}^{-1}$ , ce qui correspond à des  $\text{J K}^{-1}$ .

## Méthode de mesure: mesure de l'équivalent énergie (kT)

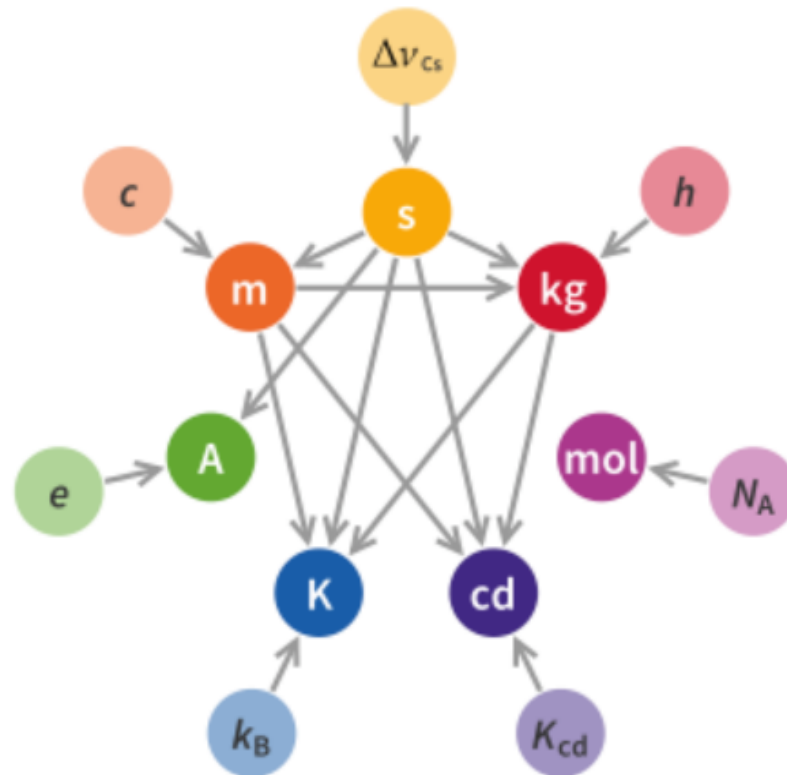
## Mole

La mole, **mol**, est l'unité de quantité de matière. Sa valeur est définie en fixant la valeur numérique du nombre d'Avogadro à exactement  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  quand elle est exprimée en  $\text{mol}^{-1}$ .



# Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international sont basées sur la définition des constantes fondamentales



# Le Système International d'Unités

## Constantes fondamentales

### Thermodynamique:

$$E = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k T \quad [J] = k[K]$$

Constante de Boltzmann

$$\Rightarrow k = \left[ \frac{J}{K} \right] = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

### Quantum $\Phi$ :

$$E = h\nu \quad [J] = h[\text{Hz}]$$

Constante de Planck

$$\Rightarrow h = \left[ \frac{J}{\text{Hz}} \right] = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

### Gravitation:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad [N] = \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \right] \left[ \frac{\text{kg}^2}{\text{m}^2} \right]$$

Constante de gravitation

$$\Rightarrow G = 6.672 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

### Electrons:

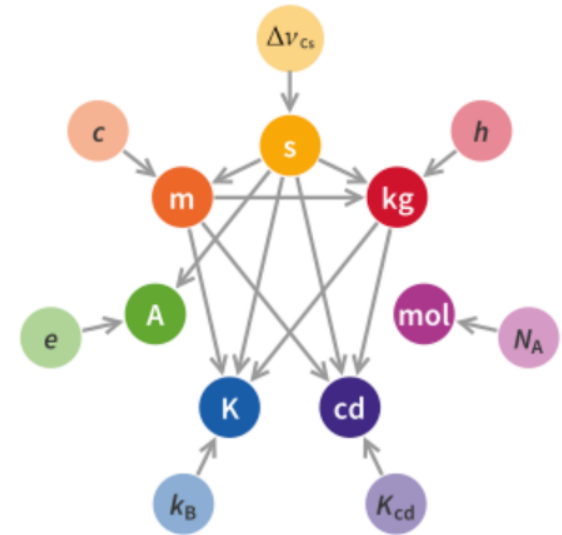
$$e/m = 1.758 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

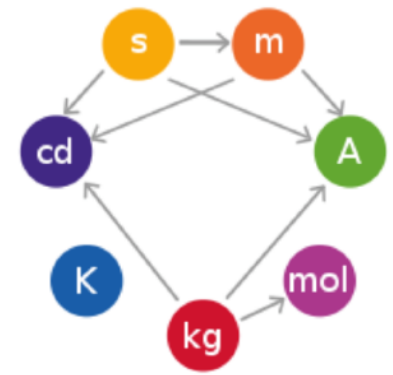
## Constante de Von Klitzing

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25812.80745 \Omega$$



# Le Système International d'Unités

## Unités dérivées du système international



Surface:

$$S = x \cdot y = [\text{m}] \cdot [\text{m}] = [\text{m}^2]$$

*Volume:*

$$V = x \cdot y \cdot z = [\text{m}] \cdot [\text{m}] \cdot [\text{m}] = [\text{m}^3]$$

*Vitesse:*

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{[\text{m}]}{[\text{s}]} = \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

**Accélération:**

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\frac{[m]}{[s]}}{\frac{1}{[s]}} = \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

*Force:*

$$F = m \cdot a = [\text{kg}] \cdot \frac{[\text{m}]}{[\text{s}^2]} = \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right] = [\text{N}]$$

**Pressure:**

$$p = \frac{F}{S} = \frac{[\text{N}]}{[\text{m}^2]} = \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] = [\text{Pa}]$$

Travail, énergie:

$$dW = \vec{F} \cdot \vec{dx} = [\text{N}] \cdot [\text{m}] = [\text{N} \cdot \text{m}] = [\text{J}]$$

*Puissance:*

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{[\text{J}]}{[\text{s}]} = \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = [\text{W}]$$

**Tension électrique :**

$$U = \frac{P}{I} = \frac{[W]}{[A]} = \left[ \frac{W}{A} \right] = [V]$$

Charge électrique:

$$dQ = I \cdot dt = [A] \cdot [s] = [A \cdot s] = [C]$$

Résistance électrique:

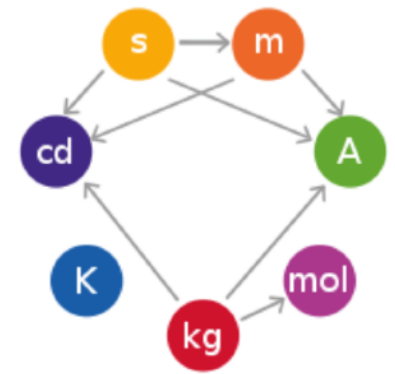
$$R = \frac{U}{I} = \frac{[\text{V}]}{[\text{A}]} = \left[ \frac{\text{V}}{\text{A}} \right] = [\Omega]$$

*Etc.*

**radian** (rad)  
**steradian** (sr)  
**herz** (Hz)  
**newton** (N)  
**pascal** (Pa)  
**joule** (J)  
**watt** (W)  
**volt** (V)  
**ohm** ( $\Omega$ )  
**siemens** (S)  
**coulomb** (C)  
**farad** (F)  
**weber** (Wb)  
**tesla** (T)  
**henry** (H)  
**lumen** (lm)  
**lux** (lx)  
**candela/m<sup>2</sup>**  
**becquerel** (Bq)  
**gray** (Gy)  
**sievert** (Sv)

# Le Système International d'Unités

## Préfixes du système international



Y	yotta	$10^{24}$
Z	zetta	$10^{21}$
E	exa	$10^{18}$
P	peta	$10^{15}$
T	tera	$10^{12}$
G	giga	$10^9$
M	mega	$10^6$
k	kilo	$10^3$
h	hecto	$10^2$
da	deca	$10^1$

d	déci	$10^{-1}$
c	centi	$10^{-2}$
m	milli	$10^{-3}$
$\mu$	micro	$10^{-6}$
n	nano	$10^{-9}$
p	pico	$10^{-12}$
f	femto	$10^{-15}$
a	atto	$10^{-18}$
z	zepto	$10^{-21}$
y	yocto	$10^{-24}$